

高精度大气折射率测量仪的设计与实现

史水娥,高杨,胥帅帅

(河南师范大学 电子与电气工程学院;河南省电磁波工程院士工作站,河南 新乡 453007)

摘要:由于地球大气的球面分层特性,雷达电波射线在传输过程中会产生大气波导传播现象.产生这种现象的主要原因是大气折射率垂直梯度上的改变,因此获得准确的大气折射率是判断大气波导存在并利用大气波导完成超视距传播的先决条件之一.高精度大气折射率测量仪以锁相技术为基本技术手段、谐振腔微扰为基本原理,利用通入高Q值谐振腔气体的介电常数与谐振腔谐振频率的变化关系,测量出频率变化量,进而反演出大气折射率.测试结果表明,高精度大气折射率测量仪对大气折射率的测量误差小,响应速度快,稳定性高,连续性好,可以有效地判断大气波导存在的高度与强度.

关键词:高精度;大气波导;高Q值谐振腔;微扰

中图分类号:TN011

文献标志码:A

折射率与物质的温度、湿度、密度、浓度、压强相关,当其中任意物理量改变时,都会引起折射率的改变^[1].当雷达电波在大气环境中传播时,电波射线会因传播路径上大气折射率的变化而发生一种弯折效应.当这种弯折效应大于某一程度时,就会发生大气波导传播现象.利用大气波导不仅可以完成雷达的超视距探测,而且可以针对由于大气波导产生的电磁盲区采取盲补偿策略^[2].获取准确的大气折射率是有效利用大气波导非常重要的一环.

大气波导的预测方法由JESKE提出,后来经过PAULUS修正.最后将其命名为P-J模式.在随后的研究中出现多种方法用以确定大气波导高度,例如MGB模式、LKB模式、COARE算法等.这些方法的基本原理均是利用温度、相对湿度、压强和风速来确定大气波导^[3-6],都会存在精度不高的问题.此外,伴随微波遥感技术的逐渐成熟,美国海军研究所利用卫星遥感技术实现了大气波导的预测,同时许多新的测量方法相继而出,如利用雷达海杂波反演大气折射率剖面的方法、利用电波掩星技术反演大气折射率等方法^[7-10].1970年左右,美国研制了微波大气折射率测试仪用以测量大气折射率.这套仪器共由两个金属微波谐振腔以及对应谐振腔的微波电路构成.但是由于技术限制,两个腔体无法做到完全一致,因此微波大气折射率测试仪测量精度并不高.伴随着科学技术的发展,锁相技术也突飞猛进,使得微波大气折射率测试仪的两个谐振腔可以由一个谐振腔所替代,提高了测量精度.现今,如何实现测量设备高精度与小型化成为各个国家研究的重点方向.本文在前人研究的基础上,利用微波技术、锁相技术与嵌入式技术研制出高精度、高灵敏度的小型化大气折射率测量仪.仪器共分为三个部分,微波部分、频率解调部分与数据处理部分.主要针对设计的原理进行展开,重点描述了测量过程中的信号走向与微波谐振腔的设计过程.通过对样机的测试发现,高精度大气折射率测量仪具有高精度与小型化的特点,并且有效的测量到了强度较小的海平面蒸发波导^[11-12].

1 原理

在大气环境中,大气气体介质的介电常数与大气折射指数满足如下关系^[13]: $n = \frac{c}{v_\varphi} = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$, 其中, n 为

收稿日期:2022-02-24;修回日期:2022-05-12.

基金项目:国家自然科学基金(62075057)

作者简介:史水娥(1976-),女,河南武陟人,河南师范大学副教授,研究方向为微波与射频技术,嵌入式技术.

通信作者:高杨,E-mail:865415205@qq.com.

大气折射指数; c 为在绝对真空中的光速; v_φ 为电磁波在气体介质中传播时的相速度; ε_γ 为电磁波在气体介质中传播时的相对介电常数; μ_γ 为相对磁导率. 并且又有 $\mu_\gamma = \frac{\mu}{\mu_0}$, 其中, μ 为气体介质磁导率, μ_0 为真空中的磁导率. 可见大气折射指数与介电常数和相对磁导率密切相关. 由于气体介质磁导率相对真空中的磁导率变化较小, 因此在实际的工程应用中 μ_γ 一般取值为 1. 这样大气气体介质的折射指数就与相对介电常数成正比. 因此只要确定所处环境的介电常数便可以求出大气折射指数.

在毫米波波段, 矩形波导的衰减程度是标准圆波导 TE_{011} 模衰减程度的 8 倍. 且当传输功率一定时, 随着传输频率的升高, 波导管壁的热损耗会迅速下降. 故对比其他模式, 圆柱形波导管 TE_{011} 模的损耗是最低的.

圆柱形谐振腔的谐振频率^[14] $f_{0TE_{011}} = \frac{v_0}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} \sqrt{\left(\frac{1}{2L}\right)^2 + \left(\frac{3.8317}{2\pi R}\right)^2}$, 其中, v_0 为电磁波波速, L 为谐振腔高度, R 为谐振腔半径. 根据上式可以得知, 当谐振腔尺寸固定, 气体介质变化时, 其相对介电常数就会随之改变, 并直接影响着微波谐振腔的谐振频率. 因此只要测出谐振腔的谐振频率就可反演出所处大气的折射指数

n . 在真空环境中, 圆柱形谐振腔的谐振频率^[15] $f_0 = v_0 \sqrt{\frac{1}{4L^2} + \left(\frac{1}{1.64R}\right)^2}$.

根据上式可以得出, 当谐振腔内充满气体介质时, 谐振频率的变化量 $\Delta f = f_0 - f_{0TE_{011}} = (n-1)f_{0TE_{011}}$. 对上式变形, 得到处于气体环境下大气折射指数 $n = 1 + \frac{\Delta f}{f_{0TE_{011}}}$.

当腔体尺寸固定并充满气体介质时, 谐振频率的变化量与介质的折射指数成正比. 因此, 只要测得谐振腔谐振频率的变化量, 就可以得到大气折射指数^[16].

大气折射指数与大气折射率的关系为^[17] $N = (n-1) \times 10^6 = \frac{\Delta f}{f_{0TE_{011}}} \times 10^6$.

考虑到稀薄大气折射指数接近 1, 并且 Δf 相对真空状态下的改变量非常小, 又有谐振频率 $f_{0TE_{011}}$ 与固有频率 f_0 都很大, 上式又可表示为 $N = \frac{\Delta f}{f_0} \times 10^6$. 只要测得谐振腔谐振频率的变化量, 即可得大气折射率.

考虑到地球曲率对电波传播路径的影响, 引入了大气修正折射率 M , 将地球表面处理为平面, 以便易于评价大气折射率梯度与其对电波传播的影响^[18]. 大气修正折射率 $M = N + \frac{z}{r_e} \times 10^6$, 其中, z 为海拔高度,

r_e 为地球平均半径, 这里取 $r_e = 6\,317$ km. 折射率梯度 dN/dz 与修正折射率梯度 dM/dz 的关系为^[19] $\frac{dM}{dz} =$

$\frac{dN}{dz} + \frac{10^6}{r_e} \cdot dM/dz < 0$ 可作为判断大气波导陷获层存在的条件^[20].

2 设计

2.1 微波部分

高精度大气折射率测量仪主要利用微扰法实现对大气折射率的测量, 为了保证测量的精度, 微波谐振腔必须具有很高的 Q 值. 由于大气折射率主要与温度、压强、湿度相关, 其中 3 cm 波长电磁波对湿度的反应最为敏感, 因此微波系统中的谐振腔设置为中心频率 9.6 GHz, 单模式工作. 腔体共由四部分构成, 上端盖、下端盖、腔身、矩形波导, 其中上下端盖完全一致. 为了保证气体可以顺利进入腔体内, 在上下端盖进行了开孔设计, 端盖模型如图 1 所示.

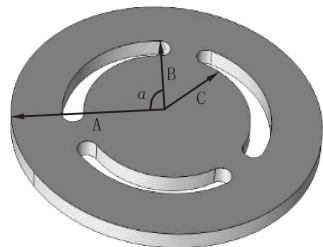


图1 谐振腔端盖模型

Fig.1 The end cap of the cavity model

TE_{011} 模式下,圆柱形谐振腔的谐振频率与腔体的几何尺寸满足 $4(fR/(\text{Hz} \cdot \text{cm}))^2 = 9 \times 10^{20} [(\frac{3.83}{\pi})^2 + (\frac{R}{L})^2]$ 其中, f 为谐振频率, R 与 L 分别为空腔半径与空腔长度. TE_{011} 模式的自干扰震荡模式为 TE_{012} , 且 TE_{111} 模式与 TE_{011} 模式线重合, 因此若想使谐振腔处于单模式工作, 必须抑制 TE_{012} 模式与 TE_{111} 模式. TE_{012} 模式下, 圆柱形谐振腔的谐振频率与腔体的几何尺寸满足如下关系 $4(fR/(\text{Hz} \cdot \text{cm}))^2 = 9 \times 10^{20} [(\frac{3.83}{\pi})^2 + 4(\frac{R}{L})^2]$. 为了抑制 TE_{012} 模式, 则 TE_{011} 模式的最大频率应小于上式的最小频率. 因此可以计算出在 TE_{011} 模式下谐振腔的最小工作半径为 1.903 6 cm, 最大工作半径为 3.828 cm. 考虑到实际加工情况, 选取半径 $B=20.625$ mm, 当腔高为 $2B$ 时, 模式损失最小. 选择这个尺寸不仅可以完成对谐振频率的选择, 而且可以抑制 TE_{012} 模式的干扰.

对于 TE_{111} 模式, 应采用磁耦合抑制方法. 在腔体侧壁中心开椭圆孔, 耦合孔半径 0.3 mm. 矩形波导通过这个椭圆孔对谐振腔进行激励. 由于端盖开孔, 会带来漏磁现象. 这一现象将直接降低谐振腔的品质因数 Q . 对 TE_{011} 模式下圆柱谐振腔的磁场和电场进行分析, 在 $r=0$ 处和 $r=R$ 处, 磁场强度的径向分量 $H_r=0$, 在圆周 φ 方向上的电流为 0. 因此, 当空气孔设计在腔体边缘时, 可近似为短路状态. 这样可以保证腔体通风, 且品质因数衰减小于 20%. 通过仿真, 当内半径 $C=16.25$ mm, 开孔角度 $\alpha=105^\circ$ 时, 品质因数最高.

使用矢量网络分析仪对尺寸设计好的谐振腔的性能指标进行测试, 得到谐振腔的具体参数如表 1 所示. 通过谐振腔的性能指标可以看出, 谐振腔具有较高的 Q 值, 可以满足实验的需求. 为了验证设计的可行性, 设计了如图 2 的实验, 分别向腔体内冲入室内空气、一氧化碳气体、氦气, 利用矢量网络分析仪(VNA)观测谐振腔的谐振频率^[21], 结果如图 3 所示.

表 1 谐振腔性能指标

Tab. 1 Resonator performance index

谐振频率	S_{11}	半功率带宽	反射相位	驻波比	无载品质因数
9.597 6 GHz	-39.44 dB	1.7 MHz	-117.2°	1.12	19 397



图2 实验可行性验证

Fig. 2 Experimental feasibility verification

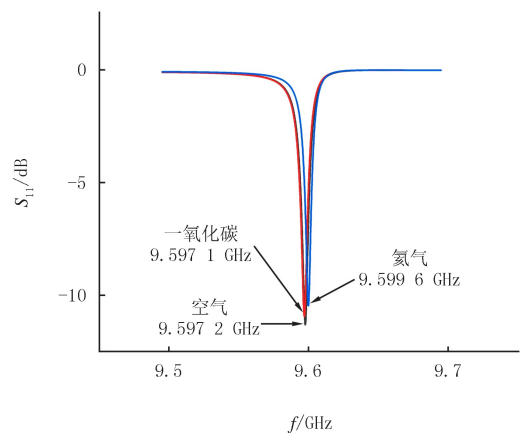


图3 充入3种气体的测试结果

Fig. 3 Test results for the three kinds of gas

查阅资料可知, 3种气体的折射率分别为 290, 298, 35, 根据图 3 的结果通过计算可以得到 3种气体的折射率依次为 284.8, 296.1, 35.4. 存在误差的原因为测试所用的气体纯度不够, 并且 VNA 测量的精度有限, 但是实验结果显示, 当充入不同折射率的气体时, 谐振频率确实发生了移动. 这确定了设计的可行性.

2.2 频率解调部分

当气体通过端盖上的气孔穿透谐振腔时, 随着气体介电常数的不同势必引起谐振腔谐振频率的变化. 因此为了检测谐振腔的谐振频率, 设计了关于测量腔体谐振频率的频率解调电路^[22]. 如图 4 是频率解调电路

结构示意图。

根据注入锁定理论,谐振腔的谐振频率很高,但是由于介电常数变化引起的谐振频率变化很小,这样可以视为在谐振频点上引起了周期性相移,因此只要检测出谐振腔输入输出信号的相位差,就可以确定谐振频率的偏移量,从而确定大气折射率。

整个频率解调电路在功能上相当于一个锁相环,核心是压控振荡器(VCO)。由VCO产生的调频波通过功分器将信号分为两路,其中一路信号通过倍频器倍频至微波频段,为谐振腔提供激励源,另一路信号发送至数据处理部分,将在后文中阐述。当信号在腔体中发生谐振后,由检波器检测出携带有折射率信息的调频波,发送至HMC984进行比相处理。比相的结果直接反映了谐振频率的变化量。利用HMC984可以将相位差信息转换为直流电压。这一直流电压直接调控VCO的输出频率,由此形成了一个闭环跟踪系统。

为了探究设计的测量精度,利用图2设计实验,将频率解调电路接入谐振腔,使用频谱分析仪对VCO输出频率进行观测。当腔体内部介质为空气时,可以发现输出频率为99.971 52 MHz,将这个频率乘以倍频倍数后,可以计算出 $N = 289.8$,利用同样的方法得到一氧化碳的输出频率为99.970 39 MHz,氦气为99.996 54 MHz,得到相应的折射率分别为295.9,35.5。

对上述结果进行分析可以得到结论,空气与氦气的测量结果精度相对较高,存在0.5的测量误差,并且氦气的气体品质较纯,对一氧化碳的测量结果,精度不够,分析原因为一氧化碳气体纯度不够。评价整体性能,高精度大气折射率测量仪具有折射率测量能力,具有较高的测量精度。其次利用示波器观测从充入气体到VCO产生相应的时间,得出结果约为0.02 s基本满足实时性的需求。

为了探究高精度大气折射率测量仪的测量稳定度,设计了如图5的实验,利用频谱分析仪对VCO输出频率展开连续3 h的观测,每1 s读取1次。时间上午8:00至11:00,实验结果如图6所示。VCO输出频率在3 h内提高了450 Hz。 N 减少4.5。在此过程中,如图6小图所示,基于100 MHz的输出频率相对波动幅度小于 10^{-8} 。这证明所设计的高精度大气折射率测量仪具有较高的稳定性。

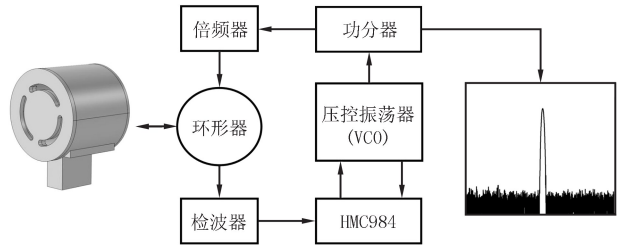


图4 频率解调电路结构图

Fig.4 Frequency demodulation circuit structure

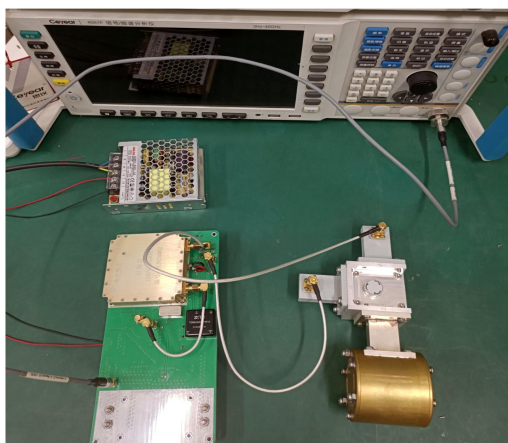


图5 稳定性测试

Fig.5 Stability test

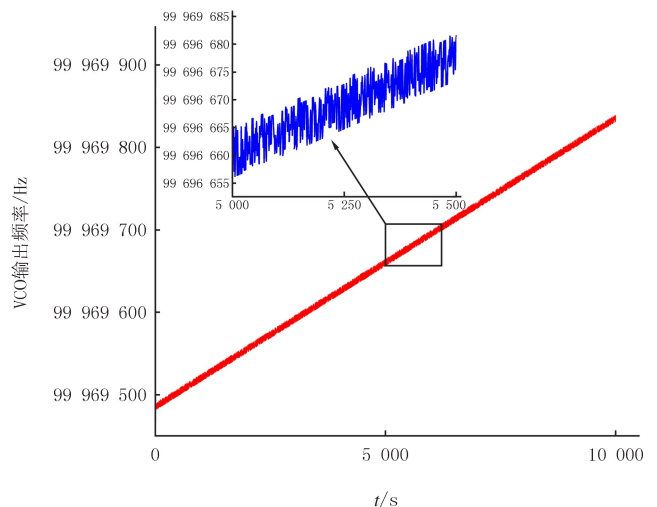


图6 稳定性测试结果

Fig.6 Stability test results

2.3 信号处理部分

当环路锁定时,由 VCO 输出携带有折射率信息的调频信号,通过功分器另一端送至信号处理部分.首先与混频器混频,计算出频率值变化量,利用低通滤波器消除高频成分后,使用迟滞比较器将波形转化为方波信号,发送至单片机(MCU)用以具体频率值的计算.同时单片机可以获取相应的高度信息、温度信息,便于对大气波导信息的标定与计算.图7为MCU在系统中的具体工作流程图.

3 测试与分析

在中国大连海边,通过吊车制作升降平台搭载高精度大气折射率测量仪、电容式折射率测量仪、“59”型探空仪,实现对海平面蒸发波导进行测算.地面温度 16.7 °C,地表温度 15.6 °C,水温 17.2 °C,相对湿度 60.1%,气压 102.33 kPa,风速 0.5 m/s,风向 159°,地面大气折射率 $N=327.82$,地面修正折射率 $M=327.82$.

由图8可知高精度大气折射率测量仪、电容式折射率测量仪、“59”型探空仪探测到波导层数依次为3层、2层、0层.3种测量方法测量精度由高至低依次为高精度大气折射率测量仪、电容式折射率测量仪、“59”型探空仪.其次电容式折射率测量仪测量曲线不够平滑,稳定度不高,并且未发现近地层波导,证明其对微小介质的变化响应程度不如高精度大气折射率测量仪.

通过对实验期间的大量数据分析发现,实验位置处波导常发生于 9:40 至 11:30 和 14:30 至 15:16.一般有波导存在会持续一定时间,在这段时间内,大气折射率测量仪在上升和下降过程中均可探测到大气波导,存在的波导强度呈由产生到强再到消失的变化规律.

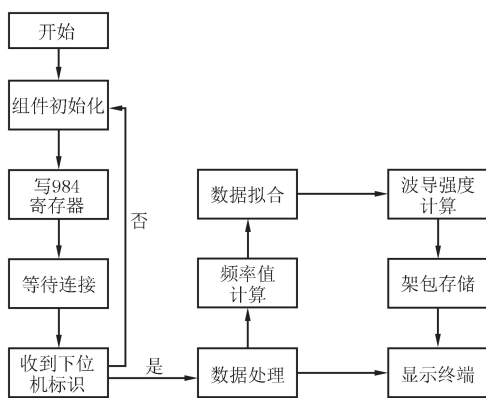


图7 单片机工作流程
Fig.7 MCU workflow

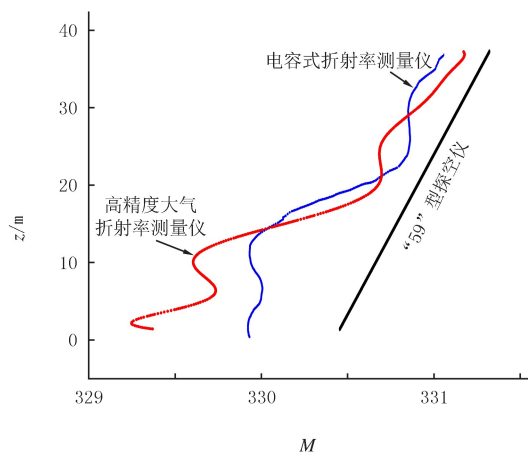


图8 垂直梯度修正折射率测量对比
Fig.8 Comparison of different testing vertical gradient correction for refractive index

4 总结

以测量大气折射率为目的,设计了以微扰法为基本原理,通过测量高Q值金属谐振腔谐振频率,反演出大气折射率的高精度大气折射率测量仪.本文所设计的高精度大气折射率测量仪,做到了测量误差小、响应延时优于 0.02 s、体积小于 39.5 cm×15 cm×38.2 cm,不但具有较高的响应灵敏度,而且在测量精度上要优于目前常用的电容式折射率测量仪与“59”型探空仪,并且解决了“59”型探空仪无法实时测量的限制,真正做到了高精度、小型化、稳定性高、连续性好.但对比电容式折射率测量仪与“59”型探空仪,高精度大气折射率测量仪的研制成本较高,其研制成本主要集中在内部使用的微波谐振腔与射频器件上,因此在后续的研究中,需着力缩减研制成本并提高模块集成度.

参 考 文 献

- [1] MOHAN S, KATO E, DRENNEN J K, et al. Refractive index measurement of pharmaceutical solids: a review of measurement methods and pharmaceutical applications[J]. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2019, 108(11): 3478-3495.
- [2] 张瑜, 甘利萍. 大气折射误差修正研究现状与展望[J]. *河南师范大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(4): 45-52.
ZHANG Y, GAN L P. Current status and prospect of researches on atmospheric refraction error correction method in radar system[J]. *Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition)*, 2016, 44(4): 45-52.
- [3] PASTORE D M, GREENWAY D P, STANEK M J, et al. Comparison of atmospheric refractivity estimation methods and their influence on radar propagation predictions[J]. *Radio Science*, 2021, 56(9): 1-17.
- [4] 胡冉冉, 赵振维, 林乐科, 等. 近地面 1 km 高度处折射率梯度与地面气象参数统计关系的研究[J]. *电波科学学报*, 2020, 35(6): 896-901.
HU R R, ZHAO Z W, LIN L K, et al. The statistical relationship between refractivity gradient in the lowest 1 km near the ground and ground meteorological parameters[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2020, 35(6): 896-901.
- [5] 闵帅博, 严利平, 崔建军, 等. 高精度空气折射率测量系统设计与实现[J]. *计量学报*, 2020, 41(11): 1332-1338.
MIN S B, YAN L P, CUI J J, et al. Design and implementation of high precision air refractive index measurement system[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2020, 41(11): 1332-1338.
- [6] YANG L, GAO J X, ZHU D T, et al. Improved zenith tropospheric delay modeling using the piecewise model of atmospheric refractivity[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(23): 3876.
- [7] 刘爱国, 察豪, 刘峰. 基于雷达海杂波的大气折射率剖面估计技术[J]. *电波科学学报*, 2007, 22(5): 867-871.
LIU A G, CHA H, LIU F. Summary on estimating atmospheric refractivity profile from radar sea clutter[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2007, 22(5): 867-871.
- [8] SINGH R, OJHA S P, ANTHES R, et al. Evaluation and assimilation of the COSMIC-2 radio occultation constellation observed atmospheric refractivity in the WRF data assimilation system[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2021, 126(18): e2021JD034935.
- [9] 张钜一, 丁佳奇, 赵小峰. 基于 GPS 探空数据的南海海域大气波导特征分析[J]. *电波科学学报*, 2020, 35(6): 841-846.
ZHANG J Y, DING J Q, ZHAO X F. Statistical analysis of atmospheric ducts in the South China Sea based on GPS sounding[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2020, 35(6): 841-846.
- [10] 张瑜, 李海涛, 李爽. 复杂环境地区电波折射修正中的折射率精确获取方法[J]. *河南师范大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(3): 42-46.
ZHANG Y, LI H T, LI S A. A method for accurately obtaining refractive index of radio wave refraction correction in complex environment[J]. *Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition)*, 2019, 47(3): 42-46.
- [11] 郭相明, 林乐科, 赵栋梁, 等. 蒸发波导模型与微波超视距传播试验对比[J]. *电波科学学报*, 2021, 36(1): 150-155.
GUO X M, LIN L K, ZHAO D L, et al. Comparison of evaporation duct models and microwave transhorizon propagation experiment[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2021, 36(1): 150-155.
- [12] JIA W T, ZHANG W M, ZHU J H, et al. The effect of boreal summer intraseasonal oscillation on evaporation duct and electromagnetic propagation over the South China Sea[J]. *Atmosphere*, 2020, 11(12): 1298.
- [13] ZHAO W P, ZHAO J, LI J C, et al. An evaporation duct height prediction model based on a long short-term memory neural network[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69(11): 7795-7804.
- [14] SHARMA P, LAO L Y, FALCONE G. A microwave cavity resonator sensor for water-in-oil measurements[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2018, 262: 200-210.
- [15] POZAR D M. *Microwave engineering*[M]. 3rd ed. Hoboken: J Wiley, 2005.
- [16] 张瑜, 秦元基, 韩明硕, 等. 测量气体折射率的微波谐振腔频率标定方法[J]. *仪表技术与传感器*, 2021(7): 117-121.
ZHANG Y, QIN Y J, HAN M S, et al. Method for calibration of microwave resonator frequency to measure refractive index of gas[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2021(7): 117-121.
- [17] 张瑜, 师帅涛. 精确测量大气折射率的微波折射率仪[J]. *海军工程大学学报*, 2009, 21(4): 26-29.
ZHANG Y, SHI S T. Microwave refractometer for accurate measurement of atmospheric refractivity[J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2009, 21(4): 26-29.
- [18] 张玉生, 郭相明, 赵强, 等. 大气波导的研究现状与思考[J]. *电波科学学报*, 2020, 35(6): 813-831.
ZHANG Y S, GUO X M, ZHAO Q, et al. Research status and thinking of atmospheric duct[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2020, 35(6): 813-831.
- [19] BEAN B R, DUTTON E J. *Radio Meteorology*[M]. New York: Dover Publications, 1968.
- [20] TURTON J, BENNETTS D A. An introduction to radio ducting[J]. *Meteor Mag*, 1988(117): 245-254.
- [21] 郝瑞刚, 刘康利, 张长明, 等. Fe_xO_y @ACSs 负载 BiOBr 材料的制备及光还原 CO_2 性能研究[J]. *河南师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(4): 68-75.

- HAO R G, LIU K L, ZHANG C M, et al. Study on the preparation and CO₂ photoreduction activity of Fe_xO_y@ACSs loaded BiOBr[J]. Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition), 2021, 49(4): 68-75.
- [22] 魏永卜, 邱选兵, 张恩华, 等. 基于数字锁相的激光光谱早期火灾预警系统[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2020, 48(3): 52-57.
- WEI Y B, QIU X B, ZHANG E H, et al. Early fire warning system based on digital lock-in amplifier using laser spectroscopy technology [J]. Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition), 2020, 48(3): 52-57.

Design and implementation of high precision atmospheric refractive index measuring instrument

Shi Shuie, Gao Yang, Xu Shuaishuai

(College of Electronic and Electrical Engineering; Academician Workstation of Henan Electromagnetic Wave Engineering, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

Abstract: Due to the spherical layered characteristics of the earth's atmosphere, atmospheric duct propagation occurs during the transmission of radar radio waves. The main reason for this phenomenon is the change in the vertical gradient of the atmospheric refractive index. Therefore, obtaining an accurate atmospheric refractive index is one of the prerequisites for judging the existence of atmospheric ducts and using atmospheric ducts to complete beyond-the-horizon propagation. The high-precision atmospheric refractive index measuring instrument uses phase-locking technology as the basic technical means and resonator perturbation as the basic principle. To use the relationship between the dielectric constant of the gas passing into the high Q resonator cavity and the resonant frequency of the resonator cavity to measure the frequency change and then invert the atmospheric refractive index. The measurement results show that the measurement error of the high-precision atmospheric refractive index measuring instrument for the atmospheric refractive index is small, and it responds quickly, with high stability and good continuity, which can effectively judge the existence of atmospheric ducts.

Keywords: high precision; atmospheric duct; high Q resonant cavity; perturbation

[责任编辑 杨浦 刘洋]